

A Study on the Time-Dependent Sverdrup Circulation in the Subarctic North Pacific Using Satellite Altimeters

著者	磯口 治
号	47
学位授与番号	1197
URL	http://hdl.handle.net/10097/39167

氏 名・(本 籍)	いそ ぐち おさむ 磯 口 治
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 第 1 1 9 7 号
学位授与年月日	平成 15 年 6 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
研 究 科, 専 攻	平成9年3月31日 東北大学大学院理学研究科 (博士課程後期 3 年の課程) 地球物理学専攻退学
学 位 論 文 題 目	A Study on the Time-Dependent Sverdrup Circulation in the Subarctic North Pacific Using Satellite Altimeters (衛星海面高度計を用いた北太平洋亜寒帯域の時間変動する スベルドラップ循環に関する研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 川 村 宏 教 授 花 輪 公 雄, 岩 崎 俊 樹 助教授 須 賀 利 雄, 木 津 昭 一

論 文 目 次

- 1 Introduction
- 2 Validation of TOPEX/POSEIDON Altimeter Data - *in situ* comparison -
 - 2.1 Introduction
 - 2.2 Data
 - 2.2.1 TOPEX/POSEIDON Altimeter Data
 - 2.2.2 *In situ* Data
 - 2.3 Results
 - 2.3.1 Comparison between T/P-Derived SLAs and Tide Gauge SLAs
 - 2.3.2 Comparison between T/P-Derived and Mooring Current Velocities
 - 2.4 Discussion
 - 2.4.1 Sea Level Comparison
 - 2.4.2 Current Velocity Comparison
 - 2.5 Summary and Conclusion
- 3 A Study on Time-Dependent Wind-Driven Circulation in the Subarctic North Pacific Using TOPEX/POSEIDON Altimeter Data
 - 3.1 Introduction
 - 3.2 Data
 - 3.2.1 Sea Level
 - 3.2.2 Wind Stress Curl
 - 3.3 Variation of SLA Fields

3.3.1	SLA Variation Related to the Steric Height Change
3.3.2	SLA Variation Related to the Current
3.3.3	Comparison With <i>in Situ</i> Current Data
3.4	Variation of Wind Stress Curl Fields
3.5	Relationship Between the T/P-Derived SLA and the Sverdrup Transport
3.5.1	Time-Dependent Relation
3.5.2	Quantitative Comparison of the Volume Transport
3.6	Summary
4	Large-Scale Sea Level Variations in the Subarctic North Pacific
4.1	Introduction
4.2	Data
4.3	Results
4.3.1	EOFs Related to Wind-Driven Circulation
4.3.2	Interannual SLA Variations
4.3.3	Comparison of SLA1 With <i>in Situ</i> Tide Gauge Data
4.4	Discussions
4.5	Summary
5	Eddies Advected by Time-Dependent Sverdrup Circulation in the Western Boundary of the Subarctic North Pacific
5.1	Introduction
5.2	Data
5.3	Results
5.3.1	General Behavior of the Eddy Movements
5.3.2	Tracking of Anticyclonic Eddies
5.4	Discussion
5.5	Summary
6	Conclusions
	Acknowledgements
	References
	Tables and figures

論文内容要旨

北太平洋亜寒帯循環系の西岸境界流の一部をなす親潮は、低温・低塩分で酸素と栄養塩に富む水塊を北日本の太平洋沿岸海域に運ぶ。親潮の変動は、東日本の気候、農業、漁業に大きな影響を及ぼす。親潮を含めた亜寒帯循環系の変動機構を解明することは、海洋物理学的な興味のみならず、社会的にも重要である。親潮変動の一つの指標として、比較的密に得られる表層水温データによって検出される親潮フロントの「南限緯度」がある。その年毎の変動は、その年の亜寒帯海域の平均的な風の変動とよく対応することが知られており、親潮フロント南限緯度変動は風成循環理論により部分的に説明されていた。しかし、この広大な海域で、力学的海面高度、流速、流量などの定量的な評価が可能な物理パラメータを用いて、

時々刻々と変化する風成循環の実態を調べた研究はこれまでにない。従来の現場観測による海洋観測手法では、短い周期で広大な海域を定量的に計測することができないからである。

1992年に運用を開始したTOPEX/POSEIDON (T/P) 海面高度計は、地溝流平衡の状態にある表層海流と対応する海面の凹凸を数cmの精度で計測することができる。T/P海面高度計は10年以上に渡って運用され、10日間隔の全球海面高度偏差マップを提供した。これらの衛星高度計データにより、数十日から数年スケールの時間変動する表層循環に関する研究が可能になった。本研究では、この海面高度計データと海上風データを用いて、時間変動する風成循環に着目し、北太平洋亜寒帯循環系の変動機構に関する研究を行った。

第1章では、本研究の背景と本論文の構成を述べた。

第2章では、2種類の現場観測データとの比較により、T/P海面高度計データの検証を行った。はじめに、衛星の繰り返し軌道に沿ったデータを加重平均して作成した1度格子のマップデータと、北太平洋の34験潮所で観測された月平均潮位データとの比較を行った。その結果、各験潮所の地域的な特性が明らかになり、3グループ「沿岸」、「外洋」、「黒潮域」に分類できることが明らかとなった。相関係数が0.5以下となった9験潮所は、アメリカ大陸西岸沿い、カムチャッカ半島、日本に位置し、これらを「沿岸」とした。相関係数は0.5以上であったが残差の標準偏差が5cm以上となった日本の南岸沿いの3験潮所は、「黒潮域」とした。それ以外の22験潮所は島に位置しており「外洋」とした。「外洋」の比較結果は、相関係数0.81、残差の標準偏差3.0cmとなり、海面高度計データは験潮所によって観測された海面高度変動を良く捉えており、大規模スケールの海洋循環研究に有効なデータであることが確かめられた。

「沿岸」、「黒潮域」について、マップデータ作成時と同じ重み付けで軌道沿いデータを作成し、加重平均前のデータとの比較を行った。マップデータを取得するために加重平均操作を行うと、岸付近の空間スケールの小さい変動を平滑化することになるので、残差の標準偏差が大きくなる。さらに、「沿岸」の岸付近の高度計データは、境界流変動の一部を捉えるので、少し沖合の外洋域のデータとは異なった振る舞いをする。これにより、「沿岸」の験潮所において、相関が低くなることが分かった。軌道直下の験潮所の潮位データは、軌道沿いデータと良い対応を示したことから、軌道沿いデータは岸沿いの海面変動も捉えていることが確かめられた。

高度計の軌道直下に係留された流速データの衛星軌道に直交する成分と、軌道沿い海面高度勾配から計算された地衡流速との比較を行った。相関係数は0.71、残差の標準偏差は3.9cm/sとなり、軌道沿いデータは、境界域の流速・流量の解析に有効なデータとなることが検証された。

第3章では、約2年間の高度計による海面高度偏差マップと、これと同時期の客観解析による海上風データを用い、北太平洋亜寒帯域の時間変動する風成循環について調べた。1年周期の調和解析の結果、北太平洋の20度以北では秋に最大値をとり、ほぼ同位相で変動する成分が卓越していることが分かった。これは、加熱・冷却に応答した海洋上層の密度変化に起因する変動（ステリックハイト）であり、海流変動にほとんど寄与しない。20度以北の領域平均値をステリックハイトに関する成分として見積もり、差し引くことで、海流に寄与する成分を強調した海面高度マップを作成した。

海面高度場の支配的な変動パターンを抽出するため、海面高度マップに対してEOF解析を行った。寄与

率20%の第1モードは、冬季に北太平洋北西部で海面が低下し、オホーツク海に向けて千島・カムチャッカ海溝を横切る方向に正の海面高度勾配を生じる季節変動パターンを示した。これは、冬季に親潮・東カムチャッカ海流が強化されることに対応する。流速の変動に相当するEOF第1モードの時間変動は、親潮域中層（1260m深）の係留系データと相関係数0.62で一致した。この結果は、海面高度のEOF第1モードが亜寒帯循環系の変動を表すモードであることを示唆する。

客観解析の風データから計算した風応力の回転の鉛直成分（風応力Curl）に対して、同様にEOF解析を行った。太平洋全域での南北振動を示したEOF第1、第3モードの時間変動は、海面高度EOF第1モードの時間変動と有意な相関を示した。これらの変動は、冬季の偏西風ジェットの下下・蛇行により亜寒帯域で正の風応力Curlが与えられ、循環系がスピニアップされることで西岸境界流が強勢となるという、風成循環理論で説明される。

内部領域での南北輸送とローカルな風応力Curlのバランスで説明されるスベルドラップ循環と、海面高度EOF第1モードの関係を調べた。第1モードの時間変動は北緯40度付近のスベルドラップ流量と最も良く対応し、相関係数は0.69であった。また、第1モードの空間パターンから計算された内部領域での南北輸送量、第1モードの時間変動との分散として軌道沿いデータから計算された西岸境界での輸送量と、風データから計算されたスベルドラップ輸送量のオーダーは一致した。以上の結果から、亜寒帯域の大規模な海面高度変動は、時間変動する風成循環によりおよそ説明され、冬季にスピニアップされる季節変動が存在することが示された。

第4章では、第3章の解析期間を6年半に延長し、高度計データ、海上風データを用いた解析を行った。また、40年以上の潮位データ、船舶観測による風データを用い、第3章で得られた風成循環の季節変動の検証を行った。

第3章と同様に海面高度マップと風応力マップに対してEOF解析を行った結果、風成循環で関係付けられる2組のペアが得られた。それぞれのEOF第1モードは、第3章で得られた第1モードと同様のパターンを示した。時間変動の相関係数は0.49で、冬季に強勢となる季節変動のみならず、その年毎の強さの変化も一致した。海面高度の第3モードと風応力Curlの第2モードは、それぞれの変動の中心が北緯50度付近に存在し、第1モードと比べて北に位置する。時間変動の相関係数は0.27と有意な相関ではないが、初冬の強いシグナルがよく一致した。

風成循環パターンについて、海面高度の2つのモードをスベルドラップ流量の時間変動と比較した。第1、第3モードの時間変動は、それぞれの変動の中心である北緯40度、50度のスベルドラップ流量と最も良く一致し、相関係数はそれぞれ0.57、0.53となった。偏西風の緯度方向の移動に対する海面の応答が、長期データの使用、または、EOF解析により、2組の定在振動パターンに分解されたと考えられる。長期間の解析においても、“時間変化する風成循環”という考え方で亜寒帯域循環変動が説明できることが分かり、さらに季節変動のみならず、亜寒帯循環系の年毎の変動を調べるということが可能であることが明らかとなった。

ステリックハイト変動と季節変動風成循環パターンのEOF第1、第3モードの変動成分を除くことにより、海面高度の経年変動マップを作成した。経度-時間プロットにより、全緯度帯で西進する擾乱のパタ

ーンが抽出された。特に、亜寒帯域においても、数年で太平洋を横断する擾乱が確認された。このような変動が、亜寒帯循環系の長期変動に影響を及ぼしていることが示唆される。

カムチャッカ半島から房総半島の太平洋に面する6観潮所の37年間の月平均潮位データに対して、EOF解析を行った。第1モードは領域全体で秋に最大となる同位相の振動を示し、ステリックハイト変動に対応するパターンが得られた。第2モードは、亜寒帯循環の西岸境界に位置する北の3観潮所で11月から1月にかけて海面が上昇する、風成循環の季節変動に対応するパターンとなった。一方、44年間の船舶観測による風データより計算された、北緯40度におけるスベルドラップ流量も同様の季節変動を示した。以上の結果、長期の潮位データ、風データにおいても高度計で得られた風成循環の季節変動が確認された。

潮位データのEOF第2モードの空間スコアが高かったカムチャッカ半島の観潮所での月平均潮位を、海面高度のEOF第1モードと比較した。相関係数は0.63で、風成循環に関する季節変動傾向のみならず、その年毎の強さも一致した。カムチャッカ半島の潮位データは亜寒帯域の風成循環に関する海面高度変動を代表し、それを用いた亜寒帯循環のモニターの可能性を示唆する結果である。

海面高度偏差マップから、亜寒帯循環の西岸境界域である千島・カムチャッカ海溝またはその斜面沿いに数個以上の渦が頻繁に見つかった。第5章では、海面高度マップを用いて西岸境界域での渦の移動を調べ、それを移流する大規模変動場との関係を調べた。渦の移動の全体像を調べるために、海溝上の数地点の変動に対するラグ相関図を作成した。ウルップ水道以南では、日本海溝上を北上してきた擾乱が向きを変え、千島・カムチャッカ海溝上を北東へ移動する。一方、カムチャッカ半島付近では、西方伝搬してきた擾乱が西岸境界に達し、海溝に沿って南西方向へ移動する様子が確認された。

続いて、個々の渦を追跡した。各海面高度マップより高気圧性渦の位置の変動を求め、海溝に沿った移動速度を算出した。移動速度の平均値は、南方の渦は北東方向、北方の渦は南西方向となり、ラグ相関図より求められた渦移動の全体像と一致した。一方、短周期の移動速度は、第4章で求めた海面高度のEOF第1モード、北緯40度でのスベルドラップ流量の時間変動と同様の変動傾向を示した。また、同期間にこの海域に離れて存在した2つの渦が、同期して変動することが明らかとなった。以上の結果、西岸境界域の渦は、ほとんどの場合、南方の渦は北東方向、北方の渦は南東方向へ移動するが、より短周期の時間スケールでは、時間変動する風成循環西岸境界流により移流されることが確かめられた。

第6章では本研究の結論をまとめた。

論文審査の結果の要旨

北太平洋亜寒帯循環系の西岸境界流の一部をなす親潮は、東日本の気候、農業、漁業に大きな影響を及ぼす。この広大な海域で、力学的海面高度、流速、流量などの定量的な評価が可能な物理パラメータを用いて、時々刻々と変化する風成循環の実態を調べた研究はこれまでにない。1992年に運用を開始したTOPEX/POSEIDON (T/P) 海面高度計は、地溝流平衡の状態にある表層海流と対応する海面の凹凸を数cmの精度で計測し、10日間隔の全球海面高度偏差マップを提供した。本研究では、この海面高度計データと海上風データを用いて、時間変動する風成循環に着目し、北太平洋亜寒帯循環系の変動機構に関する研究を行った。

まず、現場観測データとの比較により、T/P海面高度計データの検証を行い、本研究の目的に十分適う精度を持つことを確かめた。約2年間の高度計による海面高度偏差マップから、加熱・冷却に応答した海洋上層の密度変化に起因する変動成分について、領域平均を差し引くことで取り除いた。海面高度変動と客観解析海上風データから求めた風応力の回転の鉛直成分に対してEOF解析を行った結果、両者からよい相関を持つ変動パターンを抽出することができた。これにより、亜寒帯域で正の風応力Curlが与えられ、循環系がスピニアップされることで西岸境界流が強勢となるという、風成循環理論の有効性が明らかとなった。さらに、上記の解析期間を6年半に延長し、高度計データ、海上風データを用いた解析を行い、上記の結論を確認するとともに、風強制に対応した成分を取り除くと、西方伝搬する経年変動成分が明瞭に現れることが分かった。長期潮位計データの解析から、カムチャッカ半島の観測点データは亜寒帯域の風成循環に関する海面高度変動を代表し、この検潮所が亜寒帯循環のモニター点となる可能性が示唆された。

海面高度偏差マップから、亜寒帯循環の西岸境界域である千島・カムチャッカ海溝またはその斜面沿いに数個以上の渦が頻繁に見つかった。これらを追跡したところ、海面高度の風成循環成分、及び、北緯40度でのスベルドラップ流量の時間変動と同様の変動傾向を示し、時間変動する風成循環西岸境界流により移流されることが確かめられた。

以上の結果から、北太平洋の亜寒帯循環の季節変動の実態とメカニズムが明らかとなり、論文提出者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することが示された。したがって、磯口治提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。